مطالعهٔ عددی آب‌شستگی جت ریزشی آزاد★

خسرو حسینی[۱] حامد نوخاسته[۲] حجت کرمی[۳] سید امین سلامتیان[۴]

چکیده *بررسی پدیدهٔ آب‌شستگی پایین‌دست جت ریزشی پیچیده است و عوامل متعدد از جمله مشخصات جریان و رسوب و هم‌چنین هندسهٔ مجرای عبور جریان بر آن تأثیرگذار است. در تحقیق حاضر، مدل‌سازی عددی آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی از یک نمونهٔ آزمایشگاهی، توسط نرم‌افزار SSIIM2 صورت گرفته است. مقدار زبری، مدل انتقال رسوب و مدل آشفتگی با استفاده از آزمون‌های ضریب تعیین و میانگین قدرمطلق خطا واسنجی گردیده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان، عدد فرود مصالح و ارتفاع ریزش، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی آب‌شستگی، مدل عددی SSIIM، عدد فرود مصالح، جت ریزشی، ارتفاع ریزش.

Free Impinging Jets Scouring, Using Numerical Model

K. Hosseini H. Nokhasteh H. Karami S. A. Salamatian

Abstract *Investigation on local scour phenomenon downstream of impinging jets is very complicated. Different parameters such as geometry of stream, characteristics of flow and sediments have great influences on the scour phenomenon. The present study is preceded to numerical modeling of scouring by impinging jet via SSIIM 2 model founded on a physical model tests. The numerical model is calibrated for roughness coefficient, turbulence model and the bed load sediment transport function by using the coefficient of determination and the mean absolute error. Effects of Froude number, densimeteric Froude number and drop height on scouring by impinging jet were investigated. The results indicate that the maximum scour depth increases by increasing Froude number; densimeteric Froude number and drop height.*

Key Words Scouring, Numerical Modeling SSIIM, Densimetric Froude Number, Impinging Jet, Drop Height.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/٤/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/٤/۱۰ می‌باشد.

(۱) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) دانش‌آموختهٔ مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان.

(۳) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان. hkarami@semnan.ac.ir

(٤) استادیار، گروه مهندسی عمران، مؤسسهٔ غیرانتفاعی آل طه، تهران.

مقدمه

جریان خروجی از مخزن سد دارای انرژی بسیار زیادی است. برخورد جت آب با بستر، آنرا دچار آب‌شستگی می‌نماید. با آگاهی از میزان تأثیر آب‌شستگی بر سازه‌ها و محل وقوع آن، می‌توان از وجود خرابی و مشکلات ناشی از آب‌شستگی جلوگیری نمود. یکی از سازه‌های تسکین جریان در پایاب سرریزها، حوضچه‌های استغراق می‌باشد. ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی تابع پارامترهای متعددی می‌باشد که اطلاع کامل از این عوامل و نحوهٔ تأثیر آنها بر حفرهٔ آب‌شستگی، به طراحان در جانمایی حوضچه کمک زیادی نماید.

مواد و روش‌ها

استین و جولین در آزمایش‌های خود متوجه شدند که غلظت رسوب خروجی از حفرهٔ آب‌شستگی به‌وسیلهٔ جت ریزشی وابسته به پتانسیل جداشدگی ذرات رسوب می‌باشد. در نزدیکی هسته، غلظت رسوب حداکثر است و با عمق کاهش می‌یابد و هم‌چنین غلظت رسوبات با زمان کاهش می‌یابد [1]. آبیدا و تاون سند نشان دادند که طول حفرهٔ آب‌شستگی (L_s) مانند عمق آب‌شستگی با افزایش عمق پایاب (y_t) کاهش می‌یابد. زمانی که عمق نسبی پایاب کم باشد ($y_t/H < 0.2$) طول حفرهٔ آب‌شستگی ضرورتاً مستقل از عمق پایاب می‌باشد، افزایش عمق پایاب اثر زیادی روی طول حفرهٔ آب‌شستگی دارد به‌طوری که هرقدر عمق پایاب بیشتر می‌شود طول آب‌شستگی کاهش می‌یابد [2]. وستریچ و کوباس نشان دادند که تأثیر ارتفاع ریزش بر آب‌شستگی بسیار متفاوت است. در ابتدای این پدیده، حجم آب‌شستگی با افزایش ارتفاع ریزش جت H افزایش می‌یابد. سپس با افزایش H حجم آب‌شستگی ثابت می‌ماند و بعد از آن، افزایش H اثر معکوس دارد به‌طوری‌که با افزایش H حجم آب‌شستگی کاهش می‌یابد [3]. یکی از پارامترهای مورد توجه محققان در بررسی پدیده آب‌شستگی، عمق حداکثر آب‌شستگی بوده است. تعدادی از روابط ارائه‌شده توسط محققان مختلف برای پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی آزاد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ روابط ارائه‌شده توسط محققان

رابطه	محقق
$y_s + y_t = 0.14N - 0.73\frac{y_t^2}{N} + 1.7y_t$ $N = 7(\frac{Q^3H^{1.5}}{d_{50}^2})^{0.5}$	Martins [4]
$y_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25}(\frac{y_t}{d_{50}})^{0.333}$	Jaeger [5]
$\frac{y_s}{y_t} = a(\frac{y_t}{H_c})^b(Fr_{d50}\frac{R}{H_c})^c$	Ghodsian et al. [6]
$y_s = 0.526q^{0.65}4H^{0.246}d_{50}^{-0.405}$	محبوبی [۷]

در این روابط y_s (m) عمق آب‌شستگی، Q (m^3/s) دبی جریان، q (m^2/s) دبی در واحد عرض، H (m) اختلاف ارتفاع عمق آب بالادست و پایین‌دست، R(m) شعاع هیدرولیکی جت، d_{50} (m) قطر متوسط ذرات بستر، v (m/s) سرعت جت خروجی، y_t (m) عمق پایاب، H_c (m) ارتفاع ریزش، که در آن Fr_{d50} عدد فرود مصالح و a, b, c ضرایب ثابت می‌باشند.

مرسیر و همکاران به بررسی عددی آب‌شستگی جت عمودی با استفاده از مدل ترکیبی اولری لاگرانژی و معادلات ناویر–استوکس آشفته و نرم‌افزار Ansys Fluent پرداختند، روش آنها هم بخش جامد و هم بخش مایع را درنظر گرفته بود که توسط رابط کاربر از یکدیگر جدا می‌شد. آنها عنوان کردند که مدل آشفتگی k-ε برای مدل‌سازی تنش برشی و مدل k-ω برای مدل‌سازی فشار بهترین نتیجه را می‌دهد [8]. ون یان و همکاران آب‌شستگی جت صفحه‌ای مستغرق را با استفاده از مدل‌های دوبعدی مدل‌سازی نمودند. در مطالعات آنها از مدل k-ε برای آشفتگی استفاده شده است. آنها نیروی اصطکاک بین ذرات، نیروی نشت خلل و فرج و نیروی گرانش را نیروهای مقاوم در برابر حرکت و تنش برشی محلی جریان را عامل محرک درنظر گرفتند [9].

نظر به این‌که اکثر مطالعات ارائه‌شده مبتنی بر داده‌های تجربی و آزمایشگاهی است، در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از نرم‌افزار SSIIM شرایط آزمایشگاهی آب‌شستگی جت ریزشی شبیه‌سازی گردد. در این راستا واسنجی ضریب زبری، مدل آشفتگی و معادلهٔ انتقال بار بستر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از واسنجی مدل عددی، تغییر شرایط جریان و مشخصات رسوب با ارزیابی پارامترهای ارتفاع ریزش، عدد فرود جریان و عدد فرود مصالح مطالعه گردید. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان به ارزیابی جانمایی سازه‌ها و تمهیدات لازم برای مقابله با آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی پرداخت.

معرفی مدل عددی SSIIM

مدل SSIIM یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی و انتقال رسوب بر مبنای روش حجم محدود است که در دو نسخه توسط السن در سال ۱۹۹٤ معرفی شد. برای مدل کردن جریان در هندسه‌های پیچیده در SSIIM1 از شبکه‌های ساختاریافته و در SSIIM2 از شبکه‌های بدون ساختار استفاده شده است. در شبکه‌های ساختار یافتهٔ سه‌بعدی هر سلول در شبکه سه شاخص (z، y، x) دارد که مشخص کردن موقعیت شبکه را آسان می‌کند. در فایل اطلاعات ورودی موقعیت و سطوح دبی ورودی و خروجی دیواره‌ها مشخص می‌گردد. در شبکه‌های بدون ساختار هر سلول یک شاخص دارد که به‌طور تصادفی ساخته می‌شود [10].

معادلات جریان

در نرم‌افزار SSIIM معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات پیوستگی (معادلهٔ ۱) و ناویر–استوکس (معادلهٔ ۲) می‌باشند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(-P\delta_{ij}-\rho\overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

که در آن $\rho\ (kg/m^3)$ چگالی سیال، $P\ (pa)$ فشار کل، $u_i\ (m/s)$ مؤلفهٔ سرعت جریان در جهت محور i، $u_j\ (m/s)$ مؤلفهٔ سرعت جریان در جهت محور j و δ_{ij} دلتای کرونیکر می‌باشد.

در رابطهٔ (۲) عبارت اول سمت چپ ترم گذار (تغییرات زمانی) و عبارت بعدی ترم شتاب جابه‌جایی می‌باشد. اولین عبارت سمت راست در این رابطه، ترم فشار و بعدی ترم مربوط به تنش رینولدز است. برای ارزیابی عبارت اخیر به یک مدل آشفتگی نیاز می‌باشد.

مدل آشفتگی k-ε

در نرم‌افزار SSIIM2 مدل k-ε مدل پیش‌فرض برای آشفتگی می‌باشد که به‌صورت رابطهٔ (۳) توسعه یافته است.

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_i\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j})+p_k-\varepsilon \quad (3)$$

که در آن ضریب σ_k برابر با ۱ و ν_T لزجت گردابه‌ای است که توسط رابطهٔ (٤) محاسبه می‌گردد. مقدار P_k را می‌توان از رابطهٔ (٥) به‌دست آورد.

$$\nu_T=C_\mu\frac{K}{\varepsilon^2} \quad (4)$$

$$P_k=\nu_T\frac{\partial u_j}{\partial x_i}(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (5)$$

در رابطهٔ (٤)، k انرژی جنبشی آشفته و ε بیانگر میزان اتلاف انرژی جنبشی است که از رابطهٔ (٦) تعیین می‌شود. ضریب C_μ برابر ۰/۰۹ می‌باشد.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j})+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}p_k+C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

ضرایب $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ به‌ترتیب برابر با ۱/٤٤ و ۱/۹۲ می‌باشند.

معادلات انتقال رسوب

انتقال رسوب به دو صورت بار بستر و بار معلق انجام می‌شود. بار معلق را می‌توان به‌کمک معادلات پخش–انتقال با محاسبهٔ غلظت رسوب باتوجه به رابطهٔ (۷)

تعیین نمود.

$$\frac{\partial c}{\partial t}+u_i\frac{\partial c}{\partial x_j}+w\frac{\partial c}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_T\frac{\partial c}{\partial x_j}) \qquad (۷)$$

w سرعت سقوط ذرات و Γ_T ضریب پخش می‌باشد که توسط رابطهٔ (۸) محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_T=\frac{\nu_T}{Sc} \qquad (۸)$$

Sc عدد اشمیت است و به صورت پیش‌فرض برابر با یک درنظر گرفته می‌شود. ν_T نیز لزجت گردابه‌ای جریان است.
در مدل عددی SSIIM برای بار بستر، روابط انگلوند-هانسن، انیشتن، وو، ایکرز-وایت وفن راین تعریف شده‌اند.

واسنجی مدل عددی

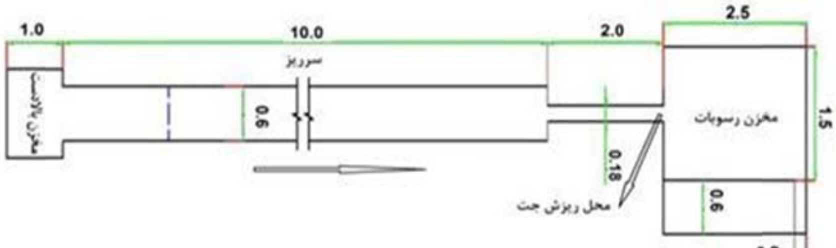
در این بخش واسنجی مدل عددی SSIIM در خصوص انتخاب زبری، تعداد سلول‌ها، مدل آشفتگی و معادلهٔ انتقال رسوب بار بستر با ارزیابی حداکثر عمق حفرهٔ آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی توسط مدل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سلامتیان [۱۱] و جن‌یان [12] بررسی گردیده است.

مدل آزمایشگاهی سلامتیان

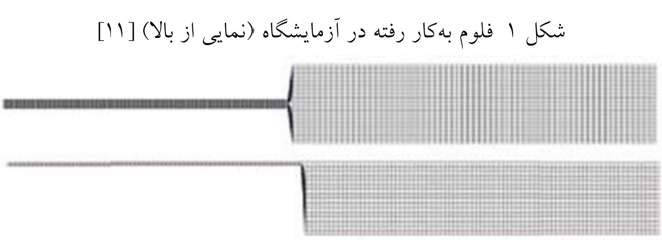
مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس و در یک فلوم به طول ۱۳ متر، طول مفید ۱۰ متر، عرض ۰/٦ متر و ارتفاع ۰/۹ منر انجام شده است. شکل (۱) نمای کلی فلوم را از بالا به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. آزمایش انجام‌شده دردبی (Q) ۱۰/۱۱ لیتر بر ثانیه و ارتفاع ریزش (H_c) برابر ۰/٦۵ صورت گرفته است.. رسوبات به‌کار رفته در آزمایش، از جنس سیلیس دانه‌بندی شده، یکنواخت و با چگالی مخصوص۲/٦۳ می‌باشد. هم‌چنین d_{50} به‌عنوان قطر مشخصهٔ ذرات و برابر ۱/۲۲ میلی‌متر درنظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که عمق پایاب در کلیهٔ آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۳ متر در نظر گرفته شده است [۱۱].

مشخصات میدان حل

شبکه‌بندی مدل به‌صورتی است که مخزن رسوب در طول دارای شبکه به نسبت x/y=0.219 (شکل ۲-الف) و در عمق برای ارتفاع ریزش ۰/٦۵ متر دارای نسبت x/z=0.323 (شکل ۲- ب) می‌باشد.
بنابر این مدلی با تعداد سلول ۱٦×۲۵×۱۹۰ (i=191, j=26, k=17) ایجاد گردیده است.



شکل ۱ فلوم به‌کار رفته در آزمایشگاه (نمایی از بالا) [۱۱]



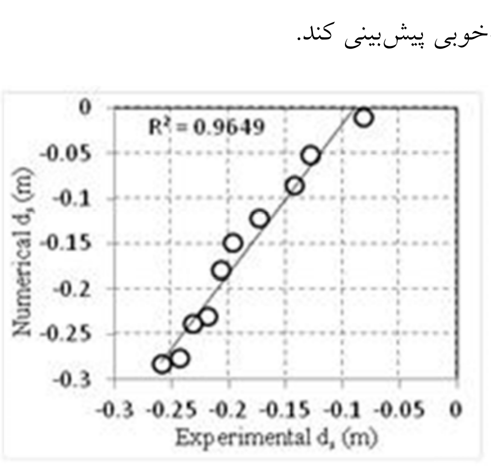
شکل ۲ مش به‌کار رفته در شبکهٔ ۱۸×۲۵×۱۹۰

واسنجی زبری

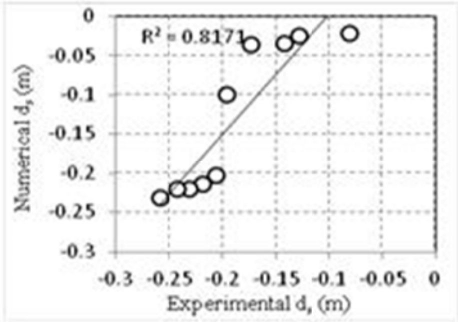
با توجه به تمام موارد پیشنهادی محققان در خصوص انتخاب ارتفاع زبری‌ها[۱] برابر قطر شاخص رسوبات بستر، مقادیر d_{50} و d_{90} به‌عنوان قطرهای شاخص زبری مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعات عمق بیشینهٔ فرسایش برای مقادیر مختلف قطر شاخص رسوب توسط نرم‌افزار تعیین شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. این مقایسه در شکل (۳) آورده شده است. ضریب همبستگی و نزدیکتر بودن نتایج عددی و آزمایشگاهی به‌دست آمده برای d_{50} نسبت به d_{90}، در شکل نشان می‌دهد که d_{50} به‌عنوان قطر شاخص رسوبات می‌تواند استفاده گردد.

واسنجی مدل آشفتگی و انتقال رسوب

به‌منظور واسنجی مدل آشفتگی و معادلات انتقال رسوب، عمق بیشینهٔ آب‌شستگی در کلیهٔ شرایط آزمایش‌شده بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. مقادیر ضریب تعیین (R^2) و متوسط باقی‌ماندهٔ مطلق به‌دست آمده و در جدول (۲) مقایسه شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل آشفتگی k-ε به همراه معادلهٔ انتقال رسوب انگولند- هانسن بهترین هم‌خوانی را با نتایج آزمایشگاهی دارد و توانسته‌است آب‌شستگی پایین‌دست جت ریزشی را به‌خوبی پیش‌بینی کند.



(الف)



(ب)

شکل ۳ آزمون R^2 برای زبری بستر به‌ترتیب d50 وd90 d90 d90

جدول ۲ نتایج آزمون R^2 و MAE

معادلهٔ انتقال رسوب بستر	مدل آشفتگی	آزمون R^2	آزمون MAE
van Rijn [13]	k-ε	۰/۸۸٦	۰/۰۸۹
	Local k-ε	۰/۹۰۹	۰/۰۸۸
Engelund/Hansen [14]	k-ε	۰/۹٦٤	۰/۰۳۹
	Local k-ε	۰/۹٤٦	۰/۰۳
Einstein [15]	k-ε	۰/۹	۰/۰۹۳
	Local k-ε	۰/۹۱	۰/۰۳۱
Wu [16]	k-ε	۰/۹۳۸	۰/۰٥٦
	Local k-ε	۰/۹٥۸	۰/۰٤٥

لازم به ذکر است که مدل فن راین برای جریان‌هایی با سرعت کم و عمق زیاد و مدل وو برای محاسبهٔ انتقال رسوب در خم‌ها نتایج بهتری می‌دهد. هم‌چنین مدل آشفتگی Local k-ε به‌دلیل صفر کردن مؤلفهٔ ε در معادلات پنج‌گانه باعث افزایش سرعت و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی و نهایتاً افزایش آب‌شستگی می‌شود.

حساسیت نسبت به مش

در این بخش به بررسی تأثیر ابعاد شبکه، بر تخمین عمق حفرهٔ آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی در مصالحی با قطر مشخصه (d_{50}) مختلف توسط مدل SSIIM پرداخته شده است. به‌منظور صحت‌سنجی

مـدل، نتـایج حاصـل از مــــدل عـددی بـا نتـایج آزمایشگاهی چن مقایسه گردیده است [12].

فلوم استفاده‌شده توسـط چـن دارای طـول ۱۱/۵ متر، ارتفاع ۰/٦ متر، عرض ۰/۳ متر می‌باشد. رسوبات در طولی برابر با ۱/۸ متر و عـرض ۰/۳ متـر در بسـتر فلـوم قـرار گرفتـه‌انـد. مشخصـات هیـدرولیکی مـدل آزمایشگاهی و خصوصیات رسوبات به‌کار گرفتـه‌شـده برای بار بستر به شرح زیر می‌باشد.

دبی (Q) برابر ٤/۰٤ لیتر بر ثانیـه، ارتفـاع ریـزش (H_c) برابر ۰/۱۸۵ متر می‌باشد. رسوبات به‌کار رفتـه در آزمایش از جنس ماسهٔ دانه‌بندی شده، یکنواخـت و بـا چگالی مخصوص ۲/٦۳ می‌باشد. هم‌چنین d_{50} به‌عنوان قطر مشخصهٔ ذرات، و رسـوباتی بـا اقطـاری برابـر بـا ۲۲/۰۳، ۱۵/۵۸، ۱۱، ٦/۷۳ میلی‌متر در آزمایش اسـتفاده شده است. عمق پایاب در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۰/۰۳۷ متر درنظر گرفته شده است [12].

مشخصات میدان حل

در مدل‌سازی عـددی از سـه شـبکه بـا ابعـاد مختلـف استفاده شده است. نسبت ابعاد مش در پلان (x/y) بـه ترتیـب ۰.۰٤٤ و ۰.۰۸۸ و ۰.۱۷۷ انتخـاب گردیدنـد.

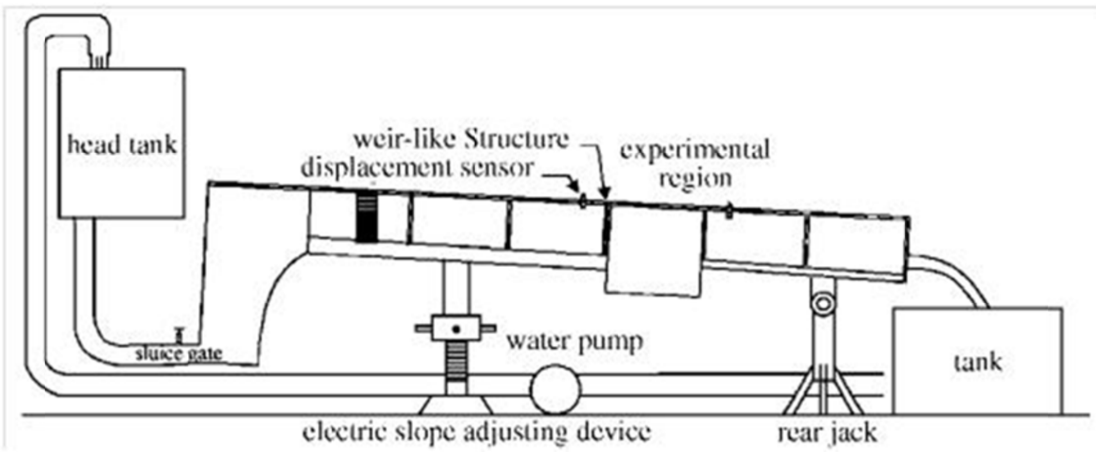
هم‌چنین در شبکه‌های مدل‌سازی شـده، ابعـاد مـش در عمق (x/z) دارای نسبت‌های ۰.۳۷۷ و ۰.۷۵۵ و ۱.۵۱۱ می‌باشد. بنابراین تعداد سلول‌ها در این مدل‌سـازی بـه ترتیب زیر می‌باشد.

600*4*34 (i=601, j=5, k=35)

300*4*34 (i= 301, j=5, k=35)

150*4*34 (i=151, j=5, k=35)

همـان‌طـور کـه در جـداول (۳) تـا (۵) مشـاهده می‌شود طبق آزمون‌های R^2 و MAE شبکهٔ ۳۰۱×۵×۳۵ توانسته است عمق حفرهٔ آب‌شستگی و هم‌چنین ارتفاع پشته‌های رسوبی را دقیق‌تر نسبت به شبکهٔ ۱۵۱×۵×۳۵ پیش‌بینی نماید. البته شبکهٔ با تعداد سـلول ٦۰۱×۵×۳۵ نتایج دقیق‌تری نسبت بـه دو شـبکهٔ دیگـر داده اسـت. لیکن اختلاف معنی‌داری بین نتایج به‌دست آمده از این شبکه و شبکهٔ درشت‌تـر بـا تعـداد سـلول ۳۰۱×۵×۳۵ وجود ندارد. از طرف دیگر، برای تحلیل‌های جریـان و رسوب در شبکه با ابعاد ریز زمان محاسـباتی بیشـتری لازم است لذا شبکه با تعداد سلول ۳۰۱×۵×۳۵ مناسب برای مدل‌سازی عددی انتخاب گردید.



شکل ٤ شکل شماتیک فلوم به‌کار رفته در آزمایش [12]

جدول ۳ نتایج آزمون R^2 و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکهٔ ۶۰۱×۵×۳۵

قطر مشخصهٔ ذرات (mm)	حداکثر عمق آب‌شستگی در مدل آزمایشگاهی (m)	حداکثر عمق آب‌شستگی(m) در مدل عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۶۰۱ سلولی	نتایج آزمون R^2	نتایج آزمون MAE
d_{50}=6.73	۰/۰۸	۰/۰۷۱۱۰	۰/۹۶۱	۰/۰۱۱
d_{50}=11	۰/۰۶	۰/۰۵۷۶۵	۰/۹۹۳	۰/۰۰۳
d_{50}=15.58	۰/۰۴۵	۰/۰۴۱۱۱	۰/۹۵۱	۰/۰۱۲
d_{50}=22.03	۰/۰۲۸	۰/۰۲۵۷	۰/۹۸۸	۰/۰۰۲

جدول ٤ نتایج آزمون R^2 و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکهٔ ۳۰۱×۵×۳۵

قطر مشخصهٔ ذرات (mm)	حداکثر عمق آب‌شستگی در مدل آزمایشگاهی (m)	حداکثر عمق آب‌شستگی(m) در مدل عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۳۰۱ سلولی	نتایج آزمون R^2	نتایج آزمون MAE
d_{50}=6.73	۰/۰۸	۰/۰۷۲۰۸	۰/۹۵۲	۰/۰۱۳
d_{50}=11	۰/۰٦	۰/۰۵۳٥٦	۰/۹۹۰	۰/۰۰۳
d_{50}=15.58	۰/۰٤٥	۰/۰۳۹۰۹	۰/۹۳٤	۰/۰۱۳
d_{50}=22.03	۰/۰۲۸	۰/۰۲٤۳٦	۰/۹۸۲	۰/۰۰۲

جدول ۵ نتایج آزمون R_2 و MAE در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی با شبکهٔ ۱۵۱×۵×۳۵

قطر مشخصهٔ ذرات (mm)	حداکثر عمق آب‌شستگی در مدل آزمایشگاهی (m)	حداکثر عمق آب‌شستگی(m) در مدل عددی با شبکهٔ ۳۵×۵×۱۵۱ سلولی	نتایج آزمون R^2	نتایج آزمون MAE
d_{50}=6.73	۰/۰۸	۰/۰٦۸۹۱	۰/۸۵	۰/۰۲۲
d_{50}=11	۰/۰٦	۰/۰٤٥۰۲	۰/۹۵۲	۰/۰۱۱
d_{50}=15.58	۰/۰٤٥	۰/۰۳۳۳۱	۰/۸۷۱	۰/۰۱٤
d_{50}=22.03	۰/۰۲۸	۰/۰۱٤۸۱	۰/۹۱۷	۰/۰۰۸

مدل‌سازی عددی و تحلیل نتایج

پس از واسنجی مدل عددی و انتخاب ابعاد مناسب شبکه در مدل عددی، شبیه‌سازی جریان و رسوب توسط مدل عددی صورت گرفته و پس از تعیین اثر پارامترهایی نظیر ارتفاع ریزش، عدد فرود مصالح، و قطر مشخصه ذرات بر حداکثر عمق آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی، به تحلیل نتایج آنها پرداخته شده است. در ادامه سعی شده است پارامترهای تأثیرگذار به‌صورت بدون بعد درآورده شود تا بتوان نتایج کلی‌تری از بررسی‌های صورت گرفته به‌دست آورد.

مشخصات مدل آزمایشگاهی

مطالعهٔ چن مبنای مدل‌سازی تحقیق حاضر می‌باشد [12]. در تحقیق حاضر با تغییر شرایط دبی، قطر ذرات بستر و ارتفاع ریزش نتایج مدل آزمایشگاهی ایشان توسعه‌داده‌شده و اطلاعات جامع‌تری نسبت به آب‌شستگی ناشی از جت ریزشی استخراج گردیده است [12].

مشخصات میدان حل

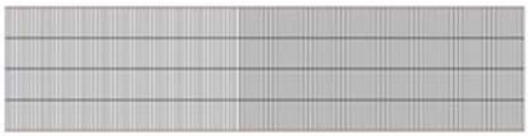
در مدل‌سازی عددی، محدودهٔ شبیه‌سازی شده از فلوم آزمایشگاهی چن دارای طول ۲ متر و عرض ۰/۳ متر می‌باشد. مدل‌سازی جریان و رسوب برای شرایط زیر صورت گرفته است:

ارتفاع ریزش آب ۰/۲۲، ۰/۲۷ و ۰/۳۷ متر برای دبی‌های ۳/۳ و ۵/۷ و ٦/۹ لیتر بر ثانیه، عمق جریان در

بالادست برابر y=0.04 متر، عمق پایاب برابر y=0.15 متر و قطر مشخصهٔ ذرات (d_{50}) برابر با ۰/۳، ۱، ۲ و ٤ میلی‌متر در مدل‌سازی عددی انتخاب گردیدند.

شبکهٔ انتخاب‌شده دارای نسبت x/y=0.088 در طول و برای ارتفاع H=0.37, 0.27, 0.22 به‌ترتیب دارای نسبت مش‌بندی x/z=1.367,1.227,1.067 در عمق می‌باشد. شکل (٥) محدودهٔ مدل‌شده و ابعاد شبکه را نشان می‌دهد.

به دلیل پیچیدگی پدیدهٔ آب‌شستگی و دخیل بودن پارامترهای متعدد در آن، در تحقیق حاضر سعی شده است با بررسی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی جت ریزشی شناختی جامع از این پدیده حاصل گردد.



(الف)



(ب)

شکل ٥ شبکهٔ به‌کار رفته در مدل‌سازی عددی برای عمق H=0.37 الف) در افق، ب) در مقطع

عدد فرود مصالح به‌دلیل درنظر گرفتن تأثیر توأمان مشخصه‌های رسوب و شرایط جریان، از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی جت ریزشی می‌باشد. محدودهٔ عدد فرود مصالح در تحقیق حاضر بین ۱/۰۸ تا ۸/۲٥ می‌باشد. عدد فرود جریان در بالادست جت ریزشی نیز به‌دلیل تأثیر در انرژی جت و قابلیت حمل مواد رسوبی یکی دیگر از پارامترهایی است که در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است.

محدودهٔ عدد فرود جریان بین ۰/٤۳۹ تا ۰/۹۱۸ می‌باشد. بنابراین محدودهٔ پارامترهای مؤثر به‌گونه‌ای انتخاب شده که حتی‌الامکان دربرگیرندهٔ شرایط مختلف جریان و رسوب باشد. در این تحقیق با درنظر گرفتن تغییر شرایط جریان و رسوب، در مجموع تعداد ۳٦ بار مدل‌سازی عددی برای مطالعه بر روی آب‌شستگی جت ریزشی انجام شده است.

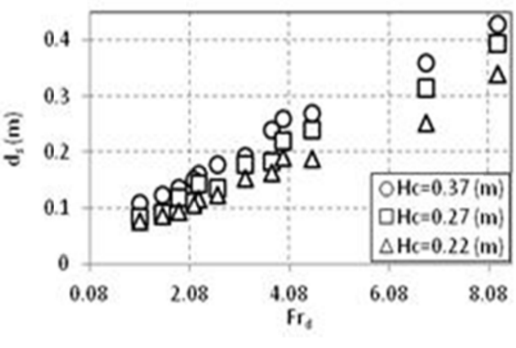
تأثیر عدد فرود مصالح بر آب‌شستگی پایین‌دست جت ریزشی

قطر ذرات رسوب بدون شک تأثیر زیادی بر ابعاد حفرهٔ آب‌شستگی دارد. درحقیقت عمق آب‌شستگی با تغییر اندازهٔ مصالح بستر، به‌علت تغییر تنش برشی مقاوم در برابر حرکت، برای ذرات بستر تغییر می‌کند. با تغییر قطر ذرات عدد فرود مصالح (Fr_d) (معادلهٔ ۱۱) نیز تغییر می‌نماید.

$$Fr_d = \frac{v}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad (۱۱)$$

که در آن v سرعت جت، d_{50} قطر مشخصه، s چگالی نسبی مصالح می‌باشد.

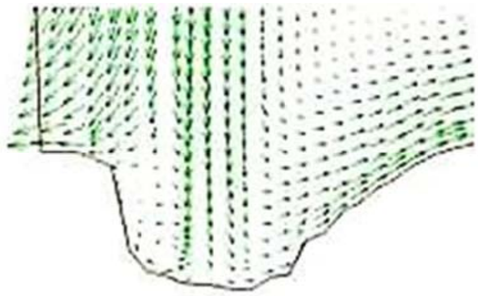
شکل (٦) عمق آب‌شستگی تابع عدد فرود مصالح نشان داده شده است.



شکل ٦ تأثیر عدد فرود مصالح بر عمق آب‌شستگی در ارتفاع ریزش متفاوت

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود مصالح، عمق آب‌شستگی افزایش

می‌یابد. این روند افزایش در هر سه ارتفاع ریزش آب اتفاق می‌افتد. طبق معادلهٔ (۱۱) عدد فرود مصالح با d_{50} رابطهٔ عکس و با سرعت جریان رابطهٔ مستقیم دارد. بنابراین با کاهش ابعاد مصالح بستر و افزایش دبی جریان، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. الگوی آب‌شستگی در چالهٔ فرسایشی ایجادشده تابع الگوی سرعت جریان و هم‌چنین آشفتگی جریان می‌باشد. در شکل (۷) الگوی جریان توسط بردارهای سرعت که اندازهٔ این بردارها معرف مقدار سرعت جریان در هر نقطه می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایی از بردارهای سرعت درون حفرهٔ آب‌شستگی

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود شکل‌گیری حفرهٔ آب‌شستگی از محل برخورد جت به بستر که دارای بیشترین سرعت می‌باشد شروع می‌گردد. با ایجاد حفره و حرکت جت به درون آن، جریان‌های چرخشی شکل می‌گیرد و موجب خارج‌شدن ذرات ریزدانه از درون حفره می‌شود و درنتیجه حفره به اطراف گسترش می‌یابد تا به یک وضعیت باثبات برسد. این ذرات در دهانهٔ خارجی حفره جایی که از پتانسیل‌های سرعت و اغتشاش جریان کاسته می‌شود، رسوب می‌کنند.

تأثیر عدد فرود جریان بر آب‌شستگی پایین‌دست جت

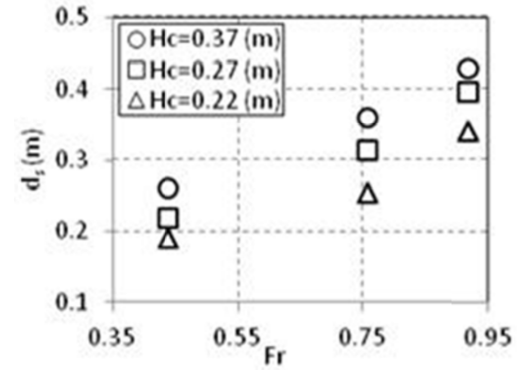
عدد فرود جریان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پدیدهٔ آب‌شستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی می‌باشد زیرا مستقیماً با سرعت و دبی جریان در ارتباط است. با افزایش عدد فرود جریان، سرعت و پتانسیل فرسایشی جت افزایش می‌یابد و درنتیجه حداکثر عمق حفرهٔ آب‌شستگی افزایش می‌یابد. اثر این پارامتر بر آب‌شستگی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد و این روند در هر سه دبی اتفاق می‌افتد. هم‌چنین در یک ارتفاع ریزش ثابت با افزایش عدد فرود حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد زیرا با افزایش عدد فرود جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد و درنتیجه نیروهای اعمال‌شده توسط جریان بر بستر و عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. عمق آب‌شستگی را می‌توان وابسته به توان فرسایش‌پذیری جریان نیز مرتبط نمود. با افزایش عدد فرود جریان، توان فرسایش پذیری جریان افزایش می‌یابد، قدرت حمل و جابه جایی مصالح افزایش پیدا می‌کند و درنتیجه، به عمق آب‌شستگی افزوده می‌شود. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش ۵۲٪ عدد فرود جریان حداکثر عمق آب‌شستگی ٤٤٪ می‌یابد.

تأثیر ارتفاع ریزش بر آب‌شستگی پایین‌دست جت ریزشی

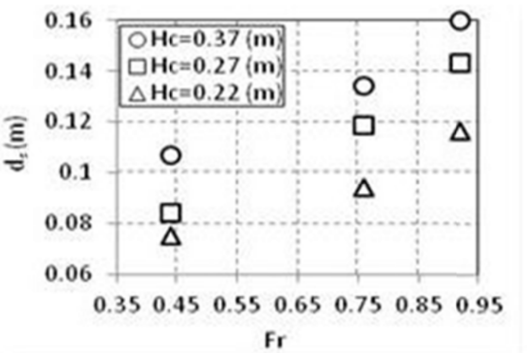
تأثیر ارتفاع ریزش بر میزان آب‌شستگی کمی پیچیده می‌باشد زیرا از یک سو با افزایش ارتفاع ریزش جت تا سطح پایاب، سرعت جت افزایش می‌یابد از سویی دیگر به‌علت اغتشاش داخلی، ورود هوا به داخل جت ریزشی افزایش می‌یابد و نیروی کشش سطحی کاهش می‌پذیرد و درنهایت جت آب و مخلوط هوا انرژی اولیه خود را از دست می‌دهد تا منجر به کاهش آب‌شستگی گردد. در بررسی‌های صورت گرفته در محدودهٔ تغییرات ارتفاع ریزش تعیین شده، ورود هوا به جریان صورت نگرفته است و اثرات کاهندگی در

فرسایش مشاهده نگردید. عمق آب‌شستگی برای ارتفاع‌های مختلف ریزش برای دو قطر متفاوت رسوبات بستر در شکل (۹) نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع ریزش، مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود جریان و دو مقدار قطر مشخصهٔ ذرات اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت اولیهٔ برخورد جت به سطح آب افزایش می‌یابد و درنتیجه عمق نفوذ جت به درون آب بیشتر می‌شود و جت نیروی بیشتری به بستر وارد می‌کند و درنتیجه حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با افزایش ۴۰٪ ارتفاع ریزش، حداکثر عمق آب‌شستگی ۲۱٪ افزایش می‌یابد.

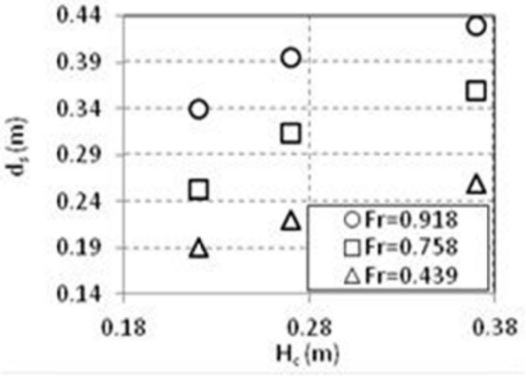


(الف)

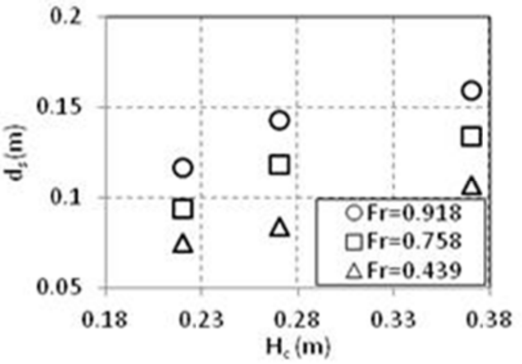


(ب)

شکل ۸ تأثیر عدد فرود جریان بر حداکثر عمق آب‌شستگی در ارتفاع ریزش‌های متفاوت به‌ترتیب , d50=0.0003 mm
d50=0.004 mm,



(الف)



(ب)

شکل ۹ تأثیر ارتفاع ریزش بر حداکثر عمق آب‌شستگی در اعداد فرود متفاوت به‌ترتیب d50=0.0003 mm، d50=0.004 mm

شناسایی پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی جت ریزشی

به‌منظور بررسی دقیقتر عوامل تأثیرگذار بر آب‌شستگی و تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی، تجزیه و تحلیل ابعادی صورت گرفته است. به‌صورت کلی ۹ عامل تأثیرگذار شناسایی گردیده‌اند که در رابطهٔ (۱۲) این عوامل نشان داده شده‌اند.

$$d_s = f_1(U, y, y_t, \rho, \rho_s, g, \nu, d_{50}, H_c) \quad (۱۲)$$

که در آن d_s حداکثر عمق آب‌شستگی، U سرعت جریان، y عمق جریان در بالادست، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی رسوب، g شتاب ثقل، υ لزجت آب، d_{50} قطر مشخصه ذرات، y_t عمق پایاب و H_c ارتفاع ریزش می‌باشد. با ترکیب پارامترهای ρ_s، ρ و g عبارت

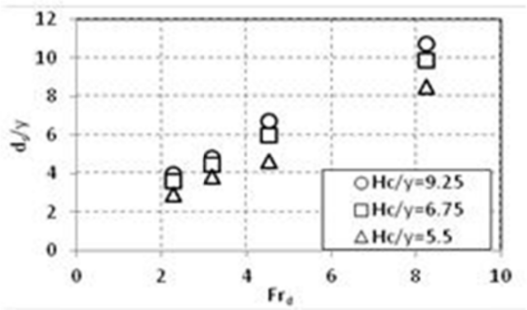
Δg به‌دست می‌آید که در آن Δ=s-1 که s چگالی نسبی می‌باشد. بنابراین به‌جای ۳ پارامتر ρ_s، ρ و g می‌توان از پارامتر Δg در تجزیه و تحلیل ابعادی استفاده نمود. بنابراین تعداد پارمترهای مؤثر در آب‌شستگی از ۹ به ٦ کاهش می‌یابد و درنتیجه با داشتن ۱۰ عامل و تعداد سه بعد اصلی (طول، زمان و جرم) می‌توان ۷ عدد بدون‌بعد به‌صورت رابطهٔ (۱۳) تعریف نمود.

$$\widetilde{d}_s = f_1(Fr_d, \widetilde{d}, \widetilde{H}, Fr, Re, \widetilde{y}_t) \qquad (۱۳)$$

که در آن $\widetilde{y}_t = \frac{y_t}{y}$، $\widetilde{d}_s = \frac{d_s}{y}$، $\widetilde{d} = \frac{d_{50}}{y}$، $\widetilde{H} = \frac{H_c}{y}$ و $Fr_d = \frac{U}{\sqrt{\Delta g d_{50}}}$ می‌باشند.

با توجه به آشفتگی جریان در مجاورت بستر و بالا بودن عدد رینولدز در کلیهٔ حالات جریان، تنش‌های ویسکوز در جریان ناچیز است و عملاً تأثیر ویسکوزیته بر حرکت سیال ناچیز می‌باشد. هم‌چنین با ثابت بودن عمق پایاب و سراب برای یک دبی مشخص جریان، عملاً نسبت y/y_t از معادلهٔ بالا حذف می‌گردد. در ادامه پارامتر بدون‌بعد آب‌شستگی نسبت به دیگر پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تأثیر پارامتر بی‌بعد عدد فرود مصالح بر نسبت *عمق آب‌شستگی.* در شکل (۱۰) تأثیر پارامتر بدون بعد عدد فرود مصالح بر نسبت آب‌شستگی بدون بعد بررسی می‌گردد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود مصالح برای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع ریزش (H_c/y) نسبت عمق آب‌شستگی (d_s/y) افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می‌افتد. دلیل آن را می‌توان به افزایش سرعت جریان و درنتیجه افزایش انرژی جنبشی جت و هم‌چنین کاهش اندازهٔ مصالح و درنتیجه کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت مرتبط دانست.

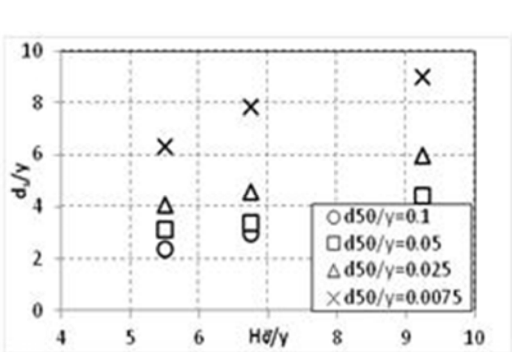


شکل ۱۰ تأثیر عدد فرود مصالح بستر و ارتفاع نسبی ریزش بر عمق آب‌شستگی نسبی برای مقدار ثابت Fr=0.918

هم‌چنین در یک عدد فرود مصالح ثابت با افزایش نسبت ارتفاع ریزش نسبت عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد که این روند در اعداد فرود بالا تأثیرگذاری بیشتری دارد. با ثابت نگه داشتن پارامترهای دیگر تغییرات عدد فرود مصالح در برابر نسبت عمق آب‌شستگی به‌صورت خطی تغییر می‌کند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با افزایش ۸۷٪ عدد فرود مصالح، حداکثر عمق آب‌شستگی ۸۳٪ افزایش می‌یابد.

تأثیر پارامتر بی‌بعد نسبت ارتفاع ریزش بر نسبت عمق آب‌شستگی

عمق آب‌شستگی نسبی تابع ارتفاع ریزش نسبی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

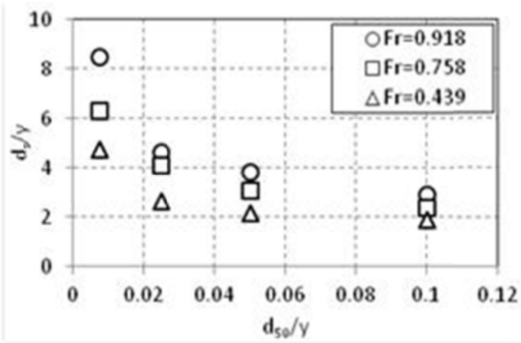


شکل ۱۱ تأثیر ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بر عمق آب‌شستگی نسبی برای مقدار ثابت Fr=0.758

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر مصالح (d_{50}/y) نسبت عمق آب‌شستگی (d_s/y) نسبت ارتفاع ریزش (H_c/y) برای مقادیر مختلف نسبت افزایش می‌یابد. که این روند برای هر سه مقدار عدد فرود اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع ریزش، سرعت جت برخوردی با بستر نیز افزایش می‌یابد و سبب افزایش عمق نسبی آب‌شستگی می‌گردد.

تأثیر پارامتر بی‌بعد نسبت قطر مشخصهٔ ذرات بر نسبت عمق آب‌شستگی

در شکل (۱۲) عمق آب شستگی نسبی برحسب قطر نسبی مصالح نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر مصالح برای مقادیر مختلف اعداد فرود نسبت عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد که این روند برای هر سه مقدار (H_c/y) اتفاق می‌افتد. علت آن را می‌توان افزایش مؤلفه‌های مقاومت ذره در برابر حرکت ازجمله وزن دانهٔ رسوب نام برد. در عدد فرود و ارتفاع ریزش ثابت نیروی بیشتری برای جابه‌جایی ذرات نیاز می‌باشد.



شکل ۱۲ تأثیر نسبت قطر مصالح بر نسبت عمق آب‌شستگی برای اعداد فرود متفاوت و ارتفاع نسبی ریزش ثابت Hc/y=5.5

موضوع دیگر این‌که هرچه نسبت (d_{50}/y) بیشتر باشد تأثیر عدد فرود جریان بر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد و به‌نظر می‌رسد به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. هم‌چنین برای مقادیر ثابت عدد فرود با افزایش (d_{50}/y) مقادیر (d_s/y) به سمت یک عدد ثابت میل می‌کند. این نسبت در مقادیر d_{50}/y بیشتر از ۰/۱ اتفاق می‌افتد. این نسبت می‌تواند به‌عنوان شاخص مصالح حفاظت بستر در محل جت ریزشی مورد استفاده قرار گیرد. نمودار عمق آب‌شستگی تابع قطر نسبی ذرات به‌صورت نمایی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

درخصوص آب‌شستگی جت ریزشی تحقیقات آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. در این تحقیقات، توجه محققان به حصول حداکثر عمق آب‌شستگی در فرآیند فرسایش پایین‌دست جت ریزشی معطوف بوده است. تأثیر عوامل مختلف شامل خصوصیات رسوب و مشخصه‌های جریان در قالب عددهای بدون‌بعد ارائه گردیده است. در تحقیق حاضر، فرآیند آب شستگی به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار SSIM صورت گرفته است. برای نیل به این هدف، ابتدا واسنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. مدل آشفتگی مناسب مدل k-ε ، زبری اعمال‌شده در مدل قطر متوسط مصالح و معادلهٔ انتقال بار بستر معادلهٔ انگلوند-هانسن تعیین گردید. سپس حساسیت سنجی نسبت به ابعاد مش در مدل عددی صورت گرفت و مشخص گردید که یک شبکه ۳۵×۵×۳۰۱ سلولی می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه نماید.

در ادامه، با استفاده از تجزیه و تحلیل ابعادی، عوامل بدون‌بعد تعیین گردیدند و نتایج عددی در قالب پارامترهای بدون بعد تحلیل شدند. در تحلیل‌های صورت‌گرفته، عمق فرسایش نسبی که نسبت عمق فرسایش بستر به عمق جریان در بالادست محل ریزش جریان می‌باشد، در تابعیت از پارامترهای مختلف دیگر شامل عدد فرود، عدد فرود مصالح، ارتفاع نسبی ریزش و قطر نسبی مصالح بررسی گردید. و نتایج زیر به‌دست آمد.

عمق آب‌شستگی نسبی تابع خطی از عدد فرود مصالح بستر می‌باشد، به‌صورتی که تغییرات عدد فرود مصالح بستر در محدودهٔ ۲ تا ۱۰، منجر به افزایش عمق فرسایش ۱ تا ۳ برابر عمق جریان برای محدودهٔ تغییرات ارتفاع نسبی ۵ تا ۱۰ می‌گردد.

یک رابطهٔ خطی با شیب مثبت بین عمق فرسایش نسبی و ارتفاع ریزش نسبی وجود دارد به‌صورتی‌که با افزایش ارتفاع نسبی ٤/٥ تا ۹/٥ میزان فرسایش از ۲/٥ تا ۹ برابر عمق جریان در محدوده‌های قطر نسبی ذرات بین ۰/۷۰۰ تا ۰/۱ متغیر می‌باشد.

یک رابطهٔ نمایی کاهشی بین عمق نسبی فرسایش و قطر نسبی مصالح بستر برای شرایط مختلف جریان وجود دارد به‌صورتی که مقدار فرسایش از ۸ تا ۲ برابر عمق جریان در کانال را برای مقادیر مختلف قطر نسبی ذرات از ۰/۰۱ تا ۱/۰ در شرایط مختلف جریان در بالادست برای عدد فرود متغیر بین ۰/٤ و ۰/۹ را نشان می دهد. لازم به ذکر است است که با افزایش قطر نسبی ذرات، ضمن کاهش عمق آب‌شستگی، وابستگی عمق آب‌شستگی به شرایط هیدرولیکی جریان بالادست کم می‌گردد به‌صورتی‌که برای مصالحی با قطر متوسطی در حدود ۱۰ درصد عمق جریان، تحت شرایط مختلف جریان در بالادست، عمق آب‌شستگی به ۲ برابر عمق جریان محدود می‌گردد. این نتیجه می‌تواند در انتخاب مصالح پوشش پایین‌دست جت ریزشی برای به حداقل رسانیدن عمق فرسایش، مؤثر باشد.

نتایجی که می‌توان از مدل عددی واسنجی‌شده به دست آورد بسیار فراتر از نتایجی است که در آزمایشگاه حاصل می‌گردد. در آزمایشگاه، به‌سبب محدودیت‌هایی از جمله تأمین دبی، فضای آزمایشگاهی و هم‌چنین هزینه‌های مربوط به آزمایش‌ها، دامنهٔ تغییرات پارامترها زیاد نمی‌باشند. لیکن در مدل عددی واسنجی‌شده، می‌توان اطلاعات بیشتری را پردازش نمود و نتایج بیشتری به‌دست آورد. در مواردی نیز میتوان بسیاری از پارامترها را که در آزمایشگاه اندازه‌گیری نشده‌اند را از نتایج مدل عددی به‌دست آورد. بنابراین مدل‌های عددی می‌توانند ابزاری باشند برای تعمیم داده‌های آزمایشگاهی و استخراج مؤلفه‌های مختلف جریان به‌دلیل محدودیت‌های مختلف که در آزمایشگاه قابل حصول نمی‌باشد.

مراجع

1. Stein, O,R. and Julien, P.Y., "Sediment concentration below free overfall", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 9, pp. 622-624, (1994).
2. Abida, H. and Townsend, R.D., "Local scour downstream of box-culvert outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* Vol. 3, pp. 425-440, (1991).
3. Westrich, B., Kobus, H., "Erosion of uniform sand bed by continuous and pulsating jet", Proceedings of IAHR ccongress, No. 1(A13), Istanbul, (1973).
4. Martins, R., "Contribution to the knowledge on scour action of free jets on rocky river beds", 11th Inter, Comm, on large dams, IIQ41. R44, (1973).
5. Jaeger, C. h., "Uber die ahnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen", Wasserwirtschaft und wassertechnik, No. 23/27, (1973).
6. Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D., "Local scour due to free overfall jets", *Journal of*

Water Management, Vol. 4, pp. 253-260, (2006).

۷. محبوبی، ا.، "اثر قطر مصالح بر میزان آب‌شستگی ناشی از جت های ریزشی آزاد"، پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۷۵).

8. Mercier. F., Bonelli, S., Anselmet, F. and Pinettes, P., "On the numerical modelling of the Jet Erosion Test", *6th International Conference on Scour and Erosion,* Paris, (2012).

9. Wanyun, X., Wenxin, H. and Zhongdong, Q., "Numerical simulation of sediment erosion by submerged plane turbulent jets", *9th International Conference On Hydrodynamics,* shanghai, (2010).

10. Olsen, N.R.B., "SSIIM User's Manual for Version 1 and 2", (2011).

۱۱. سلامتیان، س.ا.، "بررسی نرخ آب‌شستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی در مصالح یکنواخت"، پایان‌نامۀ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (۱۳۸۵).

12. Chen, J.Y., Ming, Y. and Hong, Y.M., "Characteristics of check dam scour hole by free over-fall flow", *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 6, pp. 673-680, (2001).

13. Van Rijn, L.C., "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Delft Hydr, Communication, No. 382, (1987).

14. Engelund, F. and Hansen, E., "A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams", Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, (1972).

15. Einstein, H.A. and Chien, N., "Effects of Heavy Sediment Concentration near the Bed on Velocity and Sediment Distribution", U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division Sediment Series No. 8, (1955).

16. Wu, W., Rodi, W. and wenka, T., "3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Open Channels", *J. Hydr. Engrg,* ASCE Vol. 1, pp. 4-15, (2000).